



Sustentabilidad de la PTAR El Salitre evaluada con emergía en modelos dinámicos.

Edson Amaya^{1*}, Julio Beltrán², Monika Echavarría³.

¹Cindesus. Carrera 21 núm. 56-38, Bogotá, Colombia.

²Universidad Distrital. Carrera 5 Este núm. 15-82 / Calle 14 núm. 7-46 Este (Globo B) Piso 2, Bogotá, Colombia.

³Universidad Manuela Beltrán. Avenida Circunvalar núm. 60-00, Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: cindesus@cindesus.org

Recibido 26 de agosto de 2020; aceptado 05 de octubre de 2020

RESUMEN

Se propuso un modelo de simulación dinámica para explicar el proceso de remoción de materia orgánica expresada como emergía y determinar la sustentabilidad en la planta de tratamiento (PTAR) El Salitre fase 1- Bogotá D.C., Colombia a través del tiempo, y se modeló el funcionamiento normal de la PTAR. Los modelos incluyen se basan principalmente en la DBO₅ y su remoción como variable que determina el mayor flujo de emergía, modelación que se basó en ecuaciones diferenciales y utilizó el método Euler de integración con el programa computacional Vensim Ple. La metodología de análisis de sustentabilidad, basada en el análisis de la emergía, se calculó a partir de los índices de apropiación de la emergía (EYR), carga ambiental (ELR) y sustentabilidad de la emergía (ESI); la primera simulación mostró que la planta presenta una baja sustentabilidad relacionada con la remoción de la materia orgánica, mostrando como esta variable incide en la evaluación de la emergía. El modelo mostró tener, según el análisis de sensibilidad de Montecarlo, una relación de la variación en los índices de sustentabilidad y remoción de contaminantes con respecto

al caudal, validando así el modelo y corroborando su aplicabilidad a este tipo de procesos. Esta herramienta permitirá una mejor toma de decisiones de ajuste en los procesos y operaciones de las PTAR, así como una formulación de políticas gubernamentales que mejoren los procesos de tratamiento y el flujo de energía en las ciudades.

PALABRAS CLAVE: Economía ecológica, fotobiorreactores, metabolismo de las ciudades, microalgas, sistemas de tratamiento.

ABSTRACT

A dynamic simulation model was developed to assess the sustainability of El Salitre Salitre fase 1 sewage treatment plant - Bogotá, Colombia, and the model explained the organic matter removal process in terms of energy through time. The model was mainly based on BOD₅ and its removal as the variable that defines the highest energy flow rate, modelling that was based on differential equations using Euler integration method in Vensim Ple.

The analysis of sustainability was done by assessing energy, which was determined through the indexes energy yield ration (EYR), environmental loading ration (ELR), and energy sustainability (ESI); the first simulation showed that the sewage treatment plan has low sustainability in terms of organic matter removal, showing how variable has an influence on the energy. A Monte Carlo sensitivity analysis of the model showed a variation in the sustainability indexes and in pollutant removal in relation to discharge; both facts validate the model and supported its use in this sort of systems. This model works as a suitable tool for a better decision making in sewage treatment plant operation, as well as an adjustment for government policies for improving process treatment and energy flow in cities.

KEY WORDS: Ecological economics, photobioreactors, metabolism of cities, microalgae, treatment systems.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales juegan un papel importante en la descontaminación de los cuerpos de agua; sin embargo, estas producen grandes cantidades de lodos, emisiones atmosféricas y gastos de recursos financieros en la adición de coagulantes y floculantes para su tratamiento (Dong et al., 2017); adicionalmente, los grandes caudales tratados que contienen bajos niveles de componentes químicos aún pueden ocasionar una alta carga de nutrientes en el cuerpo agua receptor (X. H. Zhang et al., 2010).

Para el año 2019, los bogotenos vertieron 12,993 y 63,596 toneladas de Carga orgánica, calculada como CDBO a los ríos Salitre y Bogotá, respectivamente (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2019), lo que ha generado impactos ambientales, sanitarios, sociales y económicos (Xue et al., 2019) a los municipios cercanos al no poder hacer uso de los servicios ecosistémicos del río.

Por otra parte, los lodos generados por los sistemas de tratamiento también generan impactos al sistema natural al ser acumulados en rellenos sanitarios, donde los cambios en el uso del suelo pueden ocasionar

contaminación del subsuelo y problemas de salud pública (Cano Londoño et al., 2017). Por consiguiente, la producción de estos lodos genera emisiones a la atmósfera; el principal gas producido es el metano, que, al ser quemado, emite dióxido de carbono a la atmósfera, aumentando las concentraciones de gases de efecto invernadero (Xue et al., 2019).

Finalmente, el tratamiento de aguas residuales genera gastos de recursos naturales renovables y no renovables, provenientes del uso de energía eléctrica y los coagulantes y floculantes químicos (Dong et al., 2017); estos últimos generan impactos al ser productos provenientes de la minería o de compuestos orgánicos producidos industrialmente.

En contraste a esta problemática, existen varias metodologías o fusiones en la evaluación de la sustentabilidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales aplicados en los últimos años, tales como el análisis de emergía, análisis de exergía, evaluación del ciclo de vida e índice de procesos sostenibles (SPI); por otra parte, la ecoeficiencia es útil para evaluar el desempeño de las PTAR combinando diferentes aspectos en el marco de la sustentabilidad (Toja et al., 2015; Senante et al., 2016). Además, se han trabajado

combinaciones de estos métodos como análisis de la emergía y ciclo de vida (Alizadeh et al., 2020). Por su parte, Cano et al. (2017) utiliza el análisis de emergía para medir la sustentabilidad de estos sistemas con respecto a los lodos.

La emergía se define como toda la energía de cualquier tipo que es emplea en la elaboración de un bien o servicio. por consiguiente, el método de análisis de la emergía es muy utilizado en los procesos de tratamiento de aguas residuales porque permite comparar diferentes tipos de tratamientos (Chen & Chen, 2009; Lu et al., 2014; Nelson et al., 2001; Siracusa & La Rosa, 2006; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2013).

Por consiguiente, es primordial que al evaluar las PTAR se tengan en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible aplicables a estos sistemas, utilizando una correcta gestión de los residuos que permita verlos como un recurso que puede ser reutilizado repercutiendo en la ecoeficiencia al entregar bienes y servicios a precios competitivos satisfaciendo las necesidades humanas y trayendo calidad de vida, mientras se reducen progresivamente los impactos ecológicos y utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, ayudando de esta manera al desarrollo

sostenible de cualquier actividad industrial (Henriques & Catarino, 2017).

Mientras tanto, para los sistemas de tratamiento de aguas residuales se requiere que las aguas cumplan con cargas mínimas permitiendo a los sistemas naturales auto depurarse, es así, como surge la necesidad de generar políticas y diseños de estos sistemas de tratamiento teniendo en cuenta los recursos no renovables escasos y los altos niveles de contaminación actuales.

Por consiguiente, es necesario aportar a la economía circular, reutilizando los residuos generados en el tratamiento de aguas residuales, generar energías renovables aplicables al metabolismo de las ciudades, como el uso de la biomasa en la producción de energía, mejorar los tratamientos biológicos de las aguas con ayuda de nuevos consorcios microbianos que mejoren las eficiencias de descontaminación, utilizar la herramientas de modelamiento para simular la dinámicas de estos sistemas que analizan los procesos y escoger los mejores escenarios para los procesos de tratamiento, generando de esta manera una maximización de la energía en las ciudades y contribuyendo al mejoramiento en la gestión de los recursos naturales.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del tratamiento de las aguas residuales en la PTAR El Salitre, fase 1 de la ciudad de Bogotá para determinar la sustentabilidad del proceso, evaluándolo con emergía en modelos dinámicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como caso de estudio, se utilizaron los datos de 10 años de trabajo de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre comprendidos entre los años 2008 al 2018. La planta se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá departamento de Cundinamarca, Colombia, y

sus coordenadas geográficas son: 4°44'14.82" N, 74°07'28.18" O a una altura de 2545 msnm; se trata de un complejo tecnológico que permite el saneamiento de un porcentaje del Río Bogotá. En la PTAR El Salitre se tratan aguas residuales del norte de la ciudad generadas por más de dos millones de bogotenses, con lo que se asegura que las aguas de la planta vertidas al río tras el proceso de tratamiento contribuyan al saneamiento de éste como principal afluente de la ciudad, así como la descontaminación de las aguas residuales captadas en la cuenca del río Salitre y los humedales Torca y La Conejera (EAAB-ESP, 2013).

Tabla 1 Análisis de resultados de los indicadores de emergía en la evaluación de la sustentabilidad.

Impacto	ELR	EYR	SI
Hace referencia a la relación que hay entre las entradas de los recursos no renovables al sistema más los recursos importados sobre los recursos renovables. (Cao and Feng, 2007)	Dependencia que tiene el proceso sobre los recursos importados o comprados para mostrar la contribución del capital natural local en la economía de la región o el proceso. (Sergio Ulgiati and Brown, 2002)	Este índice muestra la capacidad que tiene un sistema para suministrar productos o servicios con un mínimo estrés ambiental y un máximo beneficio económico (Zhang et al., 2011)	
Valor	Indica	Valor	Indica
		Valor	Indica

Bajo	<2	Proceso que tiene un bajo impacto o una gran área para disipar alguna afectación negativa.	<2	No hay contribución significativa de recursos locales y procesos casi completamente manufacturados. Débil economía y baja competición (Brown, Raugei, and Ulgiati, 2012).	<1	No es sostenible a largo plazo. (Cao and Feng, 2007)
Medio	3<ELR>10	Impacto moderado.	2<EYR>5	Indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios, además de materias primas como cemento, acero, entre otros (Sergio Ulgiati and Brown, 2002).	1>ESI>5	Se presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo.
Alto	>10	Es una carga alta para el ambiente, en la que predomina la compra de materiales importados y no renovables y/o altas emisiones. (Cao and Feng, 2007)	>5	Indica la utilización de recursos energéticos primarios (Sergio Ulgiati and Brown, 2002). Bajos valores de EYR indican un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; altos valores de EYR por el contrario, indican la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico (Zhou et al., 2010).	ESI>10	El proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. El proceso es considerado subdesarrollado (Cao and Feng, 2007).

Nota a la tabla 1: ELR es el índice de carga ambiental por sus siglas en inglés, EYR es el índice de rendimiento de la energía por sus siglas en inglés y SI es el índice de sustentabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Como primer paso metodológico, está la caracterización de los procesos; para el caso de la PTAR El Salitre, se tomaron los datos de los últimos 10 años, del 2008 al 2018, los cuales fueron extraídos de los informes de gestión de la PTAR. Se tabularon 120 datos de un total de 160, cantidad suficiente para mostrar un comportamiento en el tiempo de la PTAR El Salitre; el uso de este margen de tiempo fue utilizado en un estudio anterior para el análisis de sustentabilidad en modelos dinámicos en la ciudad de Beijing (Liu, Yang, and Chen, 2012). De los informes de gestión, se extrajo la información relevante para la evaluación de la sustentabilidad bajo la metodología propuesta de emergía.

Para lograr la evaluación de sustentabilidad a partir de la emergía, es necesario analizar los datos de los indicadores de sustentabilidad de la emergía. Para este propósito, en la tabla 1 se presentan los valores y la forma de analizar cada uno de los respectivos indicadores.

Evaluación de la sustentabilidad bajo la teoría de la emergía

Esta evaluación se realizó bajo la siguiente metodología:

- Determinación de las variables a utilizar y limitaciones del modelo.
- Elaboración de un diagrama de flujo de energía en el que se establecieron las variables necesarias para la evaluación de la emergía, según la bibliografía consultada.
- Caracterización de cada uno de los procesos con los datos obtenidos por la bibliografía para la PTAR El Salitre.
- Realización de un análisis estadístico para determinar la relación entre las variables a utilizar en el modelo.
- Para incorporar la modelación dinámica a la evaluación de emergía, se elaboró el modelo dinámico en el software Vensim Ple licenciado al grupo de investigación INDESOS de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para realizar la evaluación de la sustentabilidad bajo el método de la emergía, se utilizaron principalmente tres índices, los cuales proporcionan el álgebra que permite relacionar las diferentes variables utilizadas por el

modelo; como primera medida, las diferentes variables son expresadas en valores de energía, para lo cual se calcula la energía de cada variable y después se expresa en términos de transformidad. Estas son todas las entradas de energía solar utilizada en la elaboración de un bien o servicio (Odum, 2000). En términos algebraicos se tiene:

En la ecuación 1 se muestra el cálculo de la transformidad a partir de energía.

$$E_i = T_{ri} \times E_{xi} \quad (1)$$

En la ecuación 2 se muestra el cálculo de la transformidad a partir de materia

$$E_i = T_{ri} \times M_{xi} \quad (2)$$

Donde:

E_i (Sej) = Energía del producto como resultado de multiplicar la transformidad por masa.

$T_{ri} \left(\frac{Sej}{\text{unidad de energía}} \right)$ = Transformidad específica, valor dado por las tablas de equivalencia solares por unidad de masa.

M_{xi} (unidad de masa) = Masa que se quiere expresar en energía.

E_{xi} (unidad de energía) = Energía que se quiere expresar en energía.

La transformidad se puede calcular como se expresa en la ecuación 3, donde se observa el cálculo de transformidad a partir de la energía.

$$T_r = \frac{E_i}{E_{xi}} \quad \text{ó} \quad T_r = \frac{E_i}{M_{xi}} \quad (3)$$

Los datos de transformaciones se toman de estudios anteriores porque se necesita de mucha precisión para el cálculo de estos, empíricamente, se ha comprobado que la magnitud de los factores de transformidad no varía significativamente cuando se trata de sistemas similares (Lomas et al., 2007). Una vez calculadas las

transformaciones a emergía, se realiza el análisis de los índices de sustentabilidad, los cuales se interpretan como se muestra en la tabla 1.

Cuantificación de los impactos por emisiones y vertimientos en la evaluación de emergía

La emisión y vertimiento de contaminantes genera desequilibrios en el medio natural que repercuten en la salud de la población y, con ello, en la economía; mitigar estos impactos requerirá de emergía para remediar los daños y lograr que el contaminante se diluya o degrade a concentraciones aceptables (Yang, Li, Shen, and Hu, 2003). Por esta razón, se deben tener en cuenta estos impactos en la evaluación de la sustentabilidad bajo la teoría de la emergía. A continuación, se explica cómo se lleva a cabo el cálculo algebraico de la emergía necesaria para cuantificar estos impactos en la metodología propuesta.

Servicios ecológicos necesarios para mitigar los impactos ambientales.

La emergía puede ser determinada a partir de la concentración, el tipo de contaminante y la transformidad de los servicios en tipos ecosistémicos

relevantes. Para ello se utilizó la metodología propuesta por Ulgiati y Brown (2002), en la que se consideraron las emisiones atmosféricas y los vertimientos en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, aunque las aguas de salida han sido tratadas y aún tienen gran cantidad de contaminante por la baja eficiencia del tratamiento; no obstante, son aceptables para la normativa ambiental vigente. Esta mitigación ecológica de la contaminación tiene procesos físicos, químicos y biológicos, y a menudo esta es la última fase de tratamiento de los sistemas de descontaminación, pues ningún proceso es 100% eficiente.

En este trabajo solo se tuvieron en cuenta los servicios ecosistémicos por dilución de los contaminantes vertidos por la PTAR El Salitre. Para su cálculo, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Para el cálculo de los servicios ecosistémicos por dilución de la contaminación atmosférica, se muestra la ecuación 4.

$$M_{AD} = d \times \left(\frac{W_{AE}}{C_{AE}} \right) - M_{air} \quad (4)$$

Donde:

M_{AD} = Masa de aire necesaria para diluir el contaminante (unidades g).

M_{air} = Masa de gases que salen del tratamiento de aguas residuales (unidades g).

d = Densidad del aire 1.29×10^3 (unidades g/m^3).

W_{AE} = Promedio anual de aire emitido por el proceso de tratamiento del agua residual (unidades g).

C_{AE} = Concentraciones aceptables por la legislación para las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Datos tomados de la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros máximos permitidos para emisiones (resolución 2254 de 2017).

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu g/m^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
PM _{2,5}	25	Anual
SO ₂	50	24 horas
NO ₂	60	Anual

Luego, el valor se determina calculando la energía cinética de la dilución del aire, usando el promedio mensual de velocidad del viento en el área. Finalmente, esta energía es multiplicada por la transformicidad

1.5×10^3 sej/J (Ulgiati et al, 2002), obteniéndose así la medición del servicio ecosistémico requerido en unidades de emergía.

Para calcular los servicios ecosistémicos por la dilución de contaminantes en aguas, se utiliza la expresión algebraica de la ecuación 5.

$$M_{HD} = z \times \left(\frac{W_H}{C_H} \right) - M_{agua} \quad (5)$$

Donde:

M_{HD} = Masa de agua necesaria para diluir el contaminante (unidades g).

M_{agua} = Masa de agua vertida por el tratamiento de aguas residuales (unidades g).

z = Densidad del agua 1.00×10^6 (unidades g/m^3).

W_H = Es el promedio anual de agua vertido por el proceso de tratamiento del agua residual (unidades g).

C_H = Concentraciones aceptables por la legislación para los vertimientos de contaminantes en el agua.

Datos tomados de la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos Resolución 0631 de 2015.

Parámetro	Unidades	limites
pH	Unidades de pH	6 a 9
Demanda química de oxígeno DQO	mg/L O ₂	150
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	70
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	70

Después, el resultado es multiplicado por el promedio de la energía de escorrentía superficial del agua en el río y se multiplica por la transformicidad del flujo global del mismo.

Pérdida de energía causada por las emisiones y vertimientos.

Algunas emisiones y vertimientos pueden causar daños al ecosistema, como por ejemplo muerte de peces, eutroficación, pérdida de oxígeno disuelto, lo que ocasiona daños a la salud y, a su vez, pérdidas económicas, efectos que pueden ser calculados como

energía, estimando la pérdida monetaria del impacto en la salud y convirtiéndola a energía a través de la relación energía/dinero. Cuantificar este impacto requiere conocer las pérdidas de los componentes en el ecosistema causados por las emisiones y vertimientos, y así realizar el cálculo de la pérdida de energía a la economía, de acuerdo con lo planteado por (Ulgiati, Brown, Bastianoni, and Marchettini, 1995). Asimismo, las pérdidas hacen referencia a los impactos producidos por la contaminación a la salud humana y el uso del suelo para almacenar desechos.

Para el cálculo de esto último, se hicieron uso principalmente de dos índices: los años de vida ajustados por incapacidad (DALY por sus siglas en inglés), que, a su vez, se basa en un enfoque de la organización mundial de la salud y el consumo ecológico acumulativo de energía (ECEC por sus siglas en inglés). La relación entre DALY y ECEC es lineal, y un DALY/día de impacto a la salud humana corresponde a 9.35×10^{13} sej/día en términos de ECEC. Para este análisis, solo se tuvieron en cuenta las emisiones por CO₂ considerando el impacto generado sobre el cambio climático, donde los valores de DALY/g de emisión y ECEC/g de emisión en (sej/g)

son: 2.1×10^{10} y 7.17×10^6 , respectivamente; los otros contaminantes, como SO_2 , NO_2 y amoníaco, no se tienen en cuenta por no contar con información de la caracterización de combustión del biogás en la PTAR El Salitre, siguiendo la metodología propuesta por Zhang et al., (2010).

Para el cálculo del índice de carga ambiental, se empleó la ecuación 4.

$$ELR = \frac{(RN+F+W_E)}{R} \quad (6)$$

Donde:

RN = Total de entradas de los recursos naturales no renovables (unidades sej/a).

F = Recursos foráneos -maquinaria, recursos humanos- (unidades sej/a).

R = Total de entradas de los recursos naturales renovables (unidades sej/a).

W_E = Impacto de las emisiones, $W_E = E_I + E_S$.

E_I = Pérdida de energía a causa de las emisiones.

E_S = Servicios ecológicos necesarios para diluir la contaminación del aire y el agua a niveles aceptables (unidades en sej/a).

Biólodos = Lodos que van a disposición final.

Por otra parte, para el índice de rendimiento de la energía, se utiliza la ecuación 7.

$$EYR = \frac{(W+R+RN+F)}{F} \quad (7)$$

Donde:

RN = Total de entradas de los recursos naturales no renovables.

F = Recursos foráneos (maquinaria, recursos humanos).

R = Total de entradas de los recursos naturales renovables.

W = Emergía del agua residual de entrada.

Finalmente, para el cálculo de índice de sustentabilidad de la emergía, se utilizó la ecuación número 8.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (8)$$

Donde:

EYR = Índice de rendimiento de la emergía

ELR = Índice de carga ambiental.

RESULTADOS

Caracterización de los sistemas PTAR El Salitre

Los datos analizados fueron tomados del repositorio de informes mensuales de la PTAR El salitre durante un periodo de 10 años, comprendidos entre los años 2008 y 2018, los cuales fueron analizados estadísticamente para encontrar correlaciones entre las variables incorporadas en el modelo, encontrando una alta correlación entre los parámetros analizados; estos últimos mostraron un coeficiente de correlación mayor a 0.632 para datos normales y una correlación mayor a

0.648 para los datos no normales. Estos parámetros son: caudal de entrada con respecto a DBO₅ entrada y salida, volumen de agua residual tratada, biogás, cloruro férrico y precipitación; biogás con respecto a DBO₅ de entrada, salida y volumen de agua residual tratada; polímero con respecto a cloruro férrico, agua de consumo con respecto a polímero y cloruro férrico, precipitación con respecto a caudal de entrada DBO₅ de entrada y salida, volumen de agua residual tratada y energía eléctrica.

Iniciando el análisis de las correlaciones, la mayor fue de 0.9 entre caudal de entrada con la precipitación y el volumen total de agua residual; a su vez, estas tres tienen relación negativa con la DBO₅ de entrada y salida entre el 0.7 y el 0.9 debido al aumento de agua en el sistema, pues cuando cae la precipitación esta diluye la materia orgánica, reduciendo el parámetro DBO₅. Por otra parte, se pueden observar que existen correlaciones entre la entrada de DBO₅ de entrada y salida con la producción de biogas, lo cual se debe a que toda la materia orgánica que se encuentra en el agua residual es estimada a partir de la medida del parámetro DBO₅, y, al estabilizarse anaeróbicamente, la materia orgánica genera biogas.

La dilución de los contaminantes, vista en el parámetro concentración de DBO_5 repercutirá en la eficiencia de remoción de contaminantes y en los costos de tratamiento, relación planteada por D'Inverno et al., (2018), pero la correlación estadística con los costos es de 0.588, relación baja que no debería tener este comportamiento, porque el presupuesto mayoritariamente está representado por la compra de productos químicos, acumulando el 33% del total de los costos totales de funcionamiento de la PTAR El Salitre. Sin embargo, la baja correlación de los parámetros costos, polímero y cloruro férrico puede deberse a los otros gastos de funcionamiento, y al pago de la deuda adquirida para la construcción de la planta, aspectos que pueden hacer que no se observe la correlación esperada.

Por otra parte, la variable caudal mostró una correlación negativa con respecto al consumo de cloruro férrico como coagulante, la entrada de mayor volumen por tiempo de agua a la PTAR hace que se reduzca el gasto del coagulante, comportamiento atípico al sugerido por D'Inverno (2018); no obstante, esto puede deberse a que el agua de lluvia hace que la alcalinidad del agua aumente, mejorando la eficiencia

de los coagulantes y repercutiendo en un menor gasto. Continuando con el análisis de los coagulantes, otra correlación que se observa es con respecto al agua de consumo, que aumenta con la concentración de coagulantes, lo cual puede deberse a la necesidad que se tiene de disolver los químicos antes de su aplicación, y para esto en la PTAR utilizan agua potable; para septiembre de 2018 se utilizaron 6300 m^3 para la preparación de 12.3 ton de polímero (EAAB, 2018).

La siguiente correlación analizada es la precipitación con respecto al gasto de energía, que se explica con el aumento de la precipitación, permitiendo la acumulación de agua en el canal Salitre, el cual cumple la función de tanque de homogenización para la PTAR El Salitre; el nivel del agua aumenta y la planta debe incrementar el caudal de entrada, para lo cual, a su vez, debe accionar un número mayor de bombas, incrementando de esta manera el consumo eléctrico.

Finalmente, parámetros como el viento, ACPM, costos anuales y biosólidos no mostraron tener correlación entre ellos y los demás parámetros analizados; no obstante, son necesarios para el análisis de la sustentabilidad con el método de la emergía porque aportan gastos de energía al sistema, representado

recursos foráneos y naturales no renovables (Shao et al., 2016).

Modelamiento dinámico de la PTAR El Salitre,

fase 1

En la Figura 1 se observa el diagrama de causal para el proceso en la PTAR El Salitre, en el que destaca la entrada de carga contaminante (representada por W) y de salida (representada por WE), con el caudal de entrada como variable inicial; se observan otras variables como el agua residual, biogás y biosólidos. Por otra parte, las variables se clasifican en tres grupos principales, propuestos por la metodología de evaluación de la emergía, y son: recursos renovables (R), recursos foráneos (F) y los recursos no renovables; adicionalmente, se pueden ver las variables índices de carga ambiental (ELR), índice de rendimiento de la emergía (EYR) e índice de sustentabilidad (ESI), que servirán para la evaluación propuesta.

En la figura 1 se encuentran también cuatro bucles (uno de refuerzo) analizando el comportamiento de B1, y se aprecia que a mayor cantidad de carga contaminante se genera mayor cantidad de agua residual a tratar, lo cual genera menos eficiencia y, por consiguiente, menor

remoción de contaminantes. Es así que se demuestra que, a mayor remoción, mayor cantidad de biosólidos removidos del agua residual y menor cantidad de residuos que se vierten después del tratamiento, y finalmente, a mayor cantidad de residuos vertidos por la PTAR, mayor cantidad de residuos en el río.

En segundo lugar, B2 muestra el comportamiento de los biosólidos, biogás y carga contaminante de salida, y que, a mayor biosólidos mayor biogás se genera en el sistema, lo que provoca también mayor carga contaminante por emisiones de CO₂ a la atmosfera; mientras que, a mayor cantidad de biosólidos generados, menor cantidad de carga contaminante se volverá a verter en el río; por consiguiente, este bucle explicaría como el sistema solo está cambiando parte de la contaminación del agua a la atmosfera.

En tercer lugar, se puede analizar el comportamiento de B3, que muestra cómo el agua residual tratada en la planta hace que se aumente el uso de recursos no renovables, y esto repercute en el aumento del índice de carga ambiental; no obstante, esto podría revertirse si se hace uso de los biosólidos como recursos renovables y se disminuiría el índice en mención, considerando los biosólidos como recursos renovables. De esta forma, el

sistema podría lograr el equilibrio entre las fuentes renovables e importadas (Cano & et all, 2012).

El cuarto bucle hace referencia al comportamiento de los recursos foráneos, es decir que, a mayor cantidad de agua tratada, se utiliza en la PTAR El Salitre mayor cantidad de recursos foráneos, provocando que se reduzca el índice de rendimiento de la emergía en el sistema pero aumentando el índice de carga ambiental, ocasionando que la PTAR no sea sustentable.

Finalmente, analizando el bucle de refuerzo, se puede evidenciar que, si se toman los biosólidos y el biogás como recursos renovables y usándolos en otros procesos, se generaría una disminución en la carga ambiental de PTAR, escenario en el que el sistema podría llegar a ser sustentable.

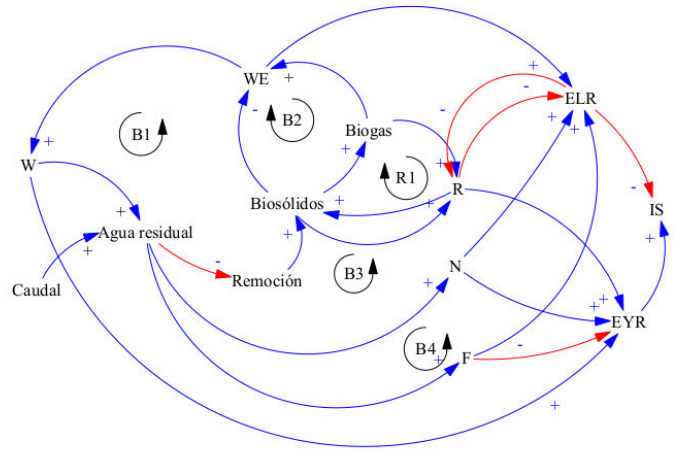


Figura 1. Diagrama causal para PTAR El Salitre. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la validación externa requirió de la recopilación de datos históricos, de campo y de laboratorio, así como referencias bibliográficas que pasaron a integrar la documentación del modelo. A partir de estos, se aplicaron la técnica de la calibración, la simulación de alternativas y un análisis de sensibilidad con el método de Montecarlo, incluido en el programa Vensim Ple (García, 2017).

Para dicha validación, se realizó el análisis de la sustentabilidad a partir de la emergía en una hoja de cálculo en Excel 2016, para luego confrontar los datos con el modelo en Vensim. A continuación, en la Tabla 4 se presentan los datos de la evaluación de emergía realizada.

Tabla 4. Datos de transformicidad para la evaluación de la energía.

Entradas	Ítem	Datos básicos	Unidades	Transformidad (sej/unidad)	Referencias	Solar Emergía (sej/a)	
	0	DBO ₅	4.679E+10	g/a	2.70E+09	(Zhang, 2010)	1.263E+20
W	1	Caudal de entrada de aguas residuales	1.293E+14	g/a	1.88E+07	(EAAB, 2014)	2.43E+21
		Sum up of 0-1					2.554E+21
R	2	Energía eléctrica	2.97E+13	J/a	8.00E+04	(Lan et al, 2002)	2.38E+18
	3	Viento	2.86E+10	J/a	2.45E+03	(Cano et al, 2014)	7.00E+13
	4	Lluvia	6.50E+11	J/a	3.10E+04	(Cano et al, 2014)	2.01E+16
	5	Sol	1.12E+16	J/a	1.00E+00	(Cano et al, 2014)	1.12E+16
	6	Oxígeno	1.343E+10	g/a	5.16E+07	(Cano et al, 2014)	6.93E+17
		Suma entre 2–6:	1.51E+10				3.10E+18
N	7	Cloruro férrico	3.71E+09	g/a	2.65E+09	(Grönlund et al, 2004)	9.82E+18
	8	Polímero	6.163E+07	g/a	3.37E+09	(Ugliati, 2002)	2.08E+17
	9	ACPM	7.12E+06	g/a	2.83E+09	(Bastianoni, 2009)	2.01E+16
	10	Área	1.05E+05	m ²		(EAAB, 2014)	0.00E+00
		Sum up of 7–9:					1.01E+19
F	10	Trabajo	6.03E+10	J/a	4.45E+06	(Cano et al, 2014)	2.68E+17
	11	Costos tratamiento	9.00E+06	US\$/a	3.46E+12	(Wang et al, 2006)	3.11E+19
	12	Agua potable	7.71E+10	J/a	6.64E+05	(Cano et al, 2014)	5.12E+16
		Sum up of 10–12:					3.15E+19
Salidas							
Salida	13	Agua tratada (drenaje)	1.27E+14	g/a			
		DQO	3.140E+10	g/a	8.66E-01		
		DBO ₅	2.72E+10	g/a			
		SS	1.03E+10	g/a			
Emisiones		CO ₂	9.28E+09	g/a			
	14	Lodos deshidratados relleno	2.303E+10	g/a			

15	Oxígeno requerido.	1,51E+10	g/a
----	--------------------	----------	-----

Tabla 5 Sumatoria de los recursos utilizados para el análisis de la emergencia.

W	R	N	F	WE
25,535.17	31.01	100.50	314.66	9010.39

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6 Indicadores de sustentabilidad a partir del análisis de la emergencia

EYR	ELR	ESI
82.6	303.9	0.3

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 5 se presentan los datos de cada uno de los grupos de recursos utilizados en la evaluación: recursos renovables, recursos foráneos, recursos no renovables, entrada y salida de residuos. Como síntesis de la información, se elabora la Tabla 6, donde se presentan los indicadores ya calculados de la carga ambiental (ELR), el índice de rendimiento de la emergencia (EYR) y el índice de sustentabilidad ambiental (ESI).

Estos datos fueron comparados con los datos obtenidos del modelo dinámico, y en la Tabla 7 se presentan los datos del modelo. Con esta tabla; no obstante, los datos indican que el proceso no es sustentable al encontrar valores inferiores a 1 (Cao et al., 2007).

Tabla 7. Análisis de la emergencia en el modelo dinámico de Vensim de la PTAR El Salitre.

Time (Años)	Índice de sustentabilidad de la emergencia” EIS	Índice de carga ambiental ELR	Índice de rendimiento de la emergencia EYR
2008	0.36	307.25	82.38
2009	0.30	230.90	90.74
2010	0.34	288.27	98.88
2011	0.38	234.83	89.85
2012	0.52	226.87	118.07
2013	0.33	244.11	80.74
2014	0.39	202.15	78.01
2015	0.41	250.88	101.81
2016	0.53	201.12	106.12

2017	0.53	183.75	97.12
2018	0.65	200.68	130.82

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se observa cómo en los años 2012, 2016, 2017 y 2018 se obtuvo una mejora en la sustentabilidad del proceso en la PTAR El Salitre, lo cual fue gracias a la disminución en el uso de recursos foráneos. En la Figura 2 se puede apreciar el comportamiento de la modelación de los recursos foráneos.

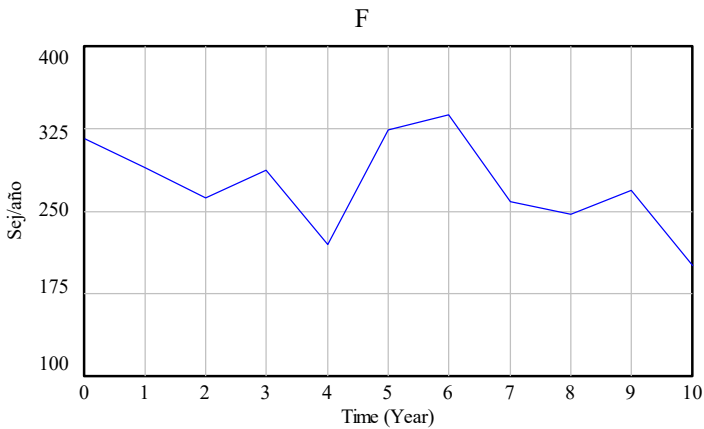


Figura 2. Simulación del uso de energía obtenida de los recursos foráneos.

Sensibilidad de los modelos (análisis de Montecarlo)

El análisis de sensibilidad comprende la modelación y la simulación, mostrando cómo el cambio de una variable independiente como caudal repercute en una variable dependiente como la carga contaminante de salida (WE),

y a su vez en los indicadores de sustentabilidad de los escenarios para la PTAR El Salitre.

El modelo mostró una relación entre la variable independiente caudal tratada en la planta y la sustentabilidad del proceso, y se evidenció en el análisis de Montecarlo, el cual se llevó a cabo con simulaciones de caudal que iniciaban en 1.22×10^8 m³/año a 1.727×10^8 m³/año, mostrando una relación entre esta variable y las variables carga contaminante de salida (WE), índice de carga ambiental (ELR), índice de rendimiento de la energía (EYR) y el índice de sustentabilidad de la energía (ESI).

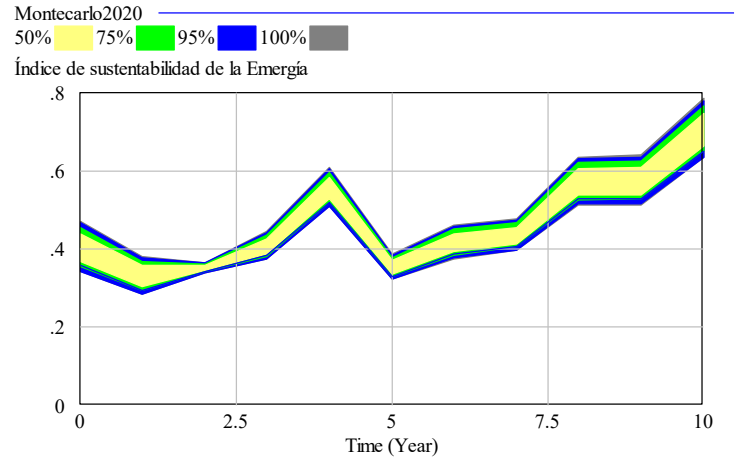


Figura 3. Comportamiento de Índice de sustentabilidad en el análisis de sensibilidad.

En la figura 3, la línea inferior azul muestra el comportamiento inicial de la PTAR El Salitre, y las zonas de color muestran la distribución de la

probabilidad de cambiar por un aumento o disminución del caudal, comportamiento corroborando y mencionado por Björklund, Geber y Rydberg (2001), y luego por Vassallo (2009), quienes argumentan que la mayor contribución a la emergía y al presupuesto total se debe al caudal de aguas residuales tratado por la planta, afectando a los indicadores de sustentabilidad y a la remoción de contaminantes.

Por otra parte, en la figura 3, el índice de sustentabilidad, con una probabilidad del 95%, mostró no lograr llegar a la sustentabilidad del proceso a causa del aumento del caudal, pues el índice llega a un valor máximo de 0.7, evidenciando no ser sustentable a largo plazo (Cao et al, 2007), lo que implica que la PTAR El Salitre realice cambios a sus procesos para lograr mejorar el índice de sustentabilidad, pues con sólo aumentar el caudal no podría mejorar este indicador.

Impacto de las emisiones

El modelo muestra que, para la PTAR El Salitre, el valor del impacto por las emisiones fue de 1.29×10^{22} sej/a, lo cual proviene de las pérdidas de emergía en un 92% y a los servicios ecológicos para diluir la contaminación en un 8%. Estos resultados son opuestos a los encontrados

por Zhang et al., (2010) porque la legislación en China es más estricta con los vertimientos que en Colombia, ya que mientras en China sólo se permiten el vertimiento de 15 mg/L para DQO y 7 mg/L para DBO₅, en Colombia la legislación permite 180 mg/L para DQO y 90 mg/L para DBO₅ lo que ocasiona reducir la carga de los servicios ecosistémicos. Por otra parte, la pérdida de emergía incrementa por la cantidad de biosólidos producidos en la PTAR El Salitre, que es 10 veces más que en el caso de estudio propuesto por Zhang (2010) para el tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Wanzhou, en China. Adicionalmente, la pérdida es causada por la disposición de biosólidos de la PTAR al perder emergía de las áreas de suelo utilizadas en la disposición de estos; por consiguiente, el valor del impacto proviene principalmente de los servicios ecosistémicos para diluir los contaminantes, que no se lograron remover en el tratamiento del agua en un 99,9%, y el restante 0,1% es el efecto de las pérdidas de emergía ocasionada por emisiones de CO₂ y las afectaciones a la salud de las persona en la ciudad (Zhang et al., 2010), emisiones que provienen del encendido de los generadores eléctricos para el funcionamiento hidráulico de los procesos cuando hay cortes en el suministro

eléctrico en la PTAR El Salitre.

Evaluación de la sustentabilidad basada en el modelo dinámico de emergía

Índice de carga ambiental

La simulación de la PTAR El Salitre mostró que el comportamiento de las entradas en los 10 años analizados es regular, con un promedio de 98.17% de la emergía entrante al sistema proveniente de los residuos orgánicos de las aguas a tratar, y 1.04% promedio de los recursos foráneos, notándose una disminución en el uso de estos recursos en los años 2012, 2015, 2016 y 2017. Además, los recursos no renovables tienen un 0.3% y los recursos renovables 0.2%, en promedio, y sus comportamientos se muestra con pocos cambios en el tiempo.

Del modelo dinámico, se obtuvieron las simulaciones de los indicadores ELR, EYR y EIS para la PTAR El Salitre, y en la Tabla 7 se presentan estos resultados, los cuales muestran que en la PTAR El Salitre la carga ambiental es alta. El resultado del índice ELR fue en promedio 233.71, y al ser mayor a 10, demostró que el sistema hace un mayor uso de recursos foráneos no renovables y que tiene una alta emisión de contaminantes, representado principalmente por el CO₂ generado al quemar el biogás

y la combustión de ACPM, el vertimiento de la carga orgánica que no pudo ser eliminada en el proceso y el uso de recursos mineros como cloruro férrico y poliacrilamida para la floculación. Lo expuesto anteriormente contrasta con el uso de recursos renovables bajos, haciendo que el índice aumente su resultado (Cao et al, 2007).

Índice de rendimiento de la emergía.

Los resultados del índice de rendimiento de la emergía (EYR) muestra un resultado mayor a 5, lo que indica que el sistema utiliza principalmente recursos energéticos primarios (Ulgiati and Brown, 2002), y este caso es la energía eléctrica proveniente principalmente de hidroeléctricas. Además, el consumo de recursos secundarios de energía, como el ACPM, es bajo en relación a las entradas de la emergía de los residuos, lo que no la hace apreciable en los resultados del rendimiento de emergía. De igual manera, valores altos en estos índices indican fuerte competencia del producto y un alto beneficio económico (Zhou et al., 2010b), es decir que, si se aprovecharan los biosólidos provenientes de este sistema, se tendría un alto beneficio económico, esto a causa de lograr tomar grandes cantidades de

energía acumulada en los residuos, condensarla en estos productos y usar bajos recursos foráneos en los procesos de producción. Por esta razón, es importante tomar los residuos provenientes del tratamiento, verlos como productos y aprovecharlos para lograr la sustentabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, tal como lo exponen Cano y compañía, (2012). Por último, el uso de los recursos locales renovables y no renovables es eficiente, y los procesos explotan dichos recursos locales mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang et al., 2010).

Índice de sustentabilidad de la emergía.

Los resultados observados en la simulación del proceso en la PTAR El Salitre mostraron que es insustentable a largo plazo al tener sus valores por debajo de 1 (Zhang et al., 2011), lo cual demuestra que el sistema suministra un servicio con un alto estrés ambiental y un mínimo beneficio económico al no hacer uso de sus subproductos, tales como biogás y biosólidos. El comportamiento observado en la simulación puede ser explicado por la entrada de los recursos foráneos, que muestran una relación negativa con la sustentabilidad, es decir, a mayor entrada de recursos foráneos, menor será

la sustentabilidad del sistema. En la Figura 3 se observa el comportamiento de los recursos foráneos en línea roja, en contraste con el comportamiento del índice de sustentabilidad en línea azul.

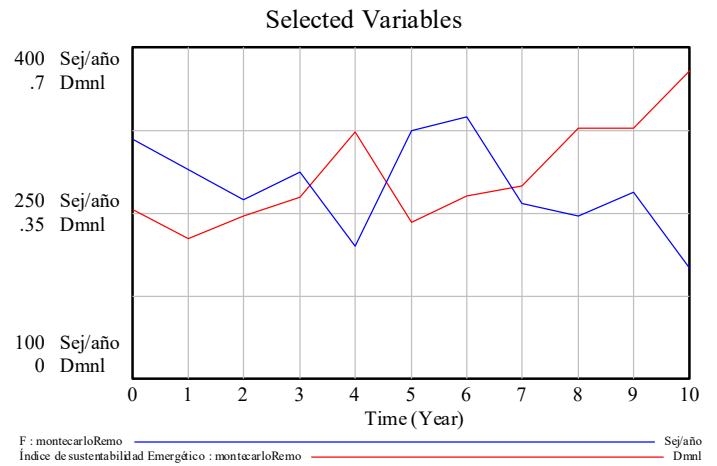


Figura 3. Simulación de las variables recursos foráneos e índice de sustentabilidad.

CONCLUSIONES

El modelo facilitó el análisis de la información recreando escenarios diferentes para el sistema evaluado, lo cual implica que esta metodología puede ser aplicada a diferentes sistemas de tratamiento de agua como herramienta de análisis para encontrar mejores alternativas y ajustar los procesos, permitiendo en las simulaciones detectar variables como la eficiencia de remoción de contaminantes, los gastos de recursos foráneos y el usos de energías alternativas, analizando las

relaciones entre ellas y visualizando una mejora de la sustentabilidad.

El modelo demostró que la PTAR El Salitre no es sustentable a corto plazo; además, para mejorar la sustentabilidad de la PTAR El Salitre es necesario hacer uso de los residuos que produce la planta, principalmente los biosólidos y el biogás, utilizándolos en la generación de energía, ya que estos influyen en la sustentabilidad del proceso. Adicional a esto, resulta crucial mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes, incorporando mejoras en el sistema, acompañado de la disminución del consumo de recursos foráneos, tales como recursos mineros y agua potable, así como la reducción de los costos de tratamiento. Esto último es particularmente posible de lograr al reducir el uso de coagulantes químicos en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

Alizadeh, S., Zafari-koloukhi, H., Rostami, F., Rouhbakhsh, M., & Avami, A. (2020). The eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants in the city of Mashhad using emergy and life cycle analyses. *Journal of Cleaner*

Production, 249, 119327.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119327>

Brown, M. T., Raugei, M., & Ulgiati, S. (2012). On boundaries and 'investments' in Emergy Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, 15(1), 227-235.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.021>

Cano Londoño, N. A., Suárez, D. G., Velásquez, H. I., & Ruiz-Mercado, G. J. (2017). Emergy analysis for the sustainable utilization of biosolids generated in a municipal wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 141, 182-193.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.033>

Cano, N. A., & et all. (2012). *Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá)* [Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín].
<http://www.bdigital.unal.edu.co/8652/>

Cao, & Feng. (2007). Distribution of Emergy Indices and Its Application. *Energy & Fuels*, 21(3), 1717-

1723. <https://doi.org/10.1021/ef060592s>
- Cao, K., & Feng, X. (2007). The emergy analysis of multi-product systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(5), 494-500.
- Cao, Kai, & Feng, X. (2007). Distribution of Emergy Indices and Its Application. *Energy & Fuels*, 21(3), 1717-1723. <https://doi.org/10.1021/ef060592s>
- Chen, B., & Chen, G. Q. (2009). Emergy-based energy and material metabolism of the Yellow River basin. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(3), 923-934. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.05.034>
- D’Inverno, G., Carosi, L., Romano, G., & Guerrini, A. (2018). Water pollution in wastewater treatment plants: An efficiency analysis with undesirable output. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.028>
- Dong, X., Zhang, X., & Zeng, S. (2017). Measuring and explaining eco-efficiencies of wastewater treatment plants in China: An uncertainty analysis perspective. *Water Research*, 112, 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.026>
- EAAB, E. de A., Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB-ESP). (2018). *Informe mensual de actividades Septiembre 2018*.
- EAAB-ESP. (2013). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Salitre*. http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/porta/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gLw2DfYHMPIwN_cyMXA09HV1cLM2MTJ5MgE_2CbEdFAO5fkgY!/?WCM_PORTLET=PC_7_81SMS7H20O72D0IAEE8634B4N0_WCM&WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/eaabv6/sacueducto/aambiental/aambsecprincipal/bambientalptarsalitre
- García, J. (2017). *Ejercicios avanzados en Dinámica de Sistemas: Vensim PLE PLUS*.
- Henriques, J., & Catarino, J. (2017). Sustainable value – An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 142, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.173>
- Liu, G. Y., Yang, Z. F., & Chen, B. (2012). Emergy-based urban dynamic modeling of long-run resource consumption, economic growth and

- environmental impact: Conceptual considerations and calibration. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1179-1188. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.112>
- Lomas, P. L., Di Donato, M., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: Una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Revista Ecosistemas*, 16(3). <http://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/91>
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Chenel, S., Marín-Navarro, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2015). Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method. *Water Research*, 68, 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.040>
- Lu, H., Yuan, Y., Campbell, D. E., Qin, P., & Cui, L. (2014). Integrated water quality, emergy and economic evaluation of three bioremediation treatment systems for eutrophic water. *Ecological Engineering*, 69, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.024>
- Molinos-Senante, M., Gémár, G., Gómez, T., Caballero, R., & Sala-Garrido, R. (2016). Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1066-1075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.057>
- Nelson, M., Odum, H. T., Brown, M. T., & Alling, A. (2001). «Living off the land»: Resource efficiency of Wetland wastewater treatment. *Advances in Space Research*, 27(9), 1547-1556. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00246-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00246-0)
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2019). *Información detallada del indicador – DBO*. <https://oab.ambientebogota.gov.co/indicadores/?id=58>
- Odum. (2000). *Handbook of Emergy Evaluation, Folio #2 Emergy of Global Processes*.
- Shao, S., Mu, H., Yang, F., Zhang, Y., & Li, J. (2016). Application of Emergy Analysis to the Sustainability Evaluation of Municipal Wastewater Treatment Plants. *Sustainability*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.3390/su9010008>
- Siracusa, G., & La Rosa, A. D. (2006). Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation

- using the emergy analysis. *Ecological Modelling*, 197(3-4), 490-497.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.019>
- Ulgiati, S., Brown, M. T., Bastianoni, S., & Marchettini, N. (1995). Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological Engineering*, 5(4), 519-531.
[https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00043-7)
- Ulgiati, Sergio, & Brown, M. T. (2002). Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions The case of electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 14.
- Vassallo, P., Paoli, C., & Fabiano, M. (2009). Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 35(5), 687-694.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.11.002>
- Xue, X., Cashman, S., Gaglione, A., Mosley, J., Weiss, L., Ma, X. C., Cashdollar, J., & Garland, J. (2019). Holistic analysis of urban water systems in the Greater Cincinnati region: (1) life cycle assessment and cost implications. *Water Research* X, 2, 100015.
<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2018.100015>
- Yang, H., Li, Y., Shen, J., & Hu, S. (2003). Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system: An application of the eEmergy approach. *Ecological Modelling*, 160(1-2), 13-21.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00288-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00288-0)
- Zhang, X., Deng, S., Wu, J., & Jiang, W. (2010). A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emergy. *Ecological Engineering*, 36(5), 685-696.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.010>
- Zhang, X., Deng, S., Zhang, Y., Yang, G., Li, L., Qi, H., Xiao, H., Wu, J., Wang, Y., & Shen, F. (2011). Emergy evaluation of the impact of waste exchanges on the sustainability of industrial systems. *Ecological Engineering*, 37(2), 206-216.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.001>
- Zhang, X. H., Deng, S., Jiang, W., Zhang, Y., Peng, H., Li, L., Yang, G., & Li, Y. (2010). Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 182-195.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.007>
- Zhang, X., Wei, Y., Li, M., Deng, S., Wu, J., Zhang, Y.,

- & Xiao, H. (2014). Emergy evaluation of an integrated livestock wastewater treatment system. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 95-107.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.003>
- Zhang, Y., Liu, J., Zhang, J., & Wang, R. (2013). Emergy-based evaluation of system sustainability and ecosystem value of a large-scale constructed wetland in North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5595-5609.
<https://doi.org/10.1007/s10661-012-2970-9>
- Zhou, S. Y., Zhang, B., & Cai, Z. F. (2010). Emergy analysis of a farm biogas project in China: A biophysical perspective of agricultural ecological engineering. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(5), 1408-1418.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.06.001>